

交通弱者にやさしい自転車歩行者道 整備のためのバリア調査

斎藤健治 | 佐賀大学理工学部都市工学科

(a) 調査
佐賀大学理工学部都市工学科 斎藤健治

1. はじめに

現在の日本における歩行・自転車走行環境は、自動車利用環境に比べ貧弱、劣悪といわざるを得ない。例えば、悪舗装、狭い幅員、車優先のすりつけ勾配や排水のための横断勾配など、車利用者の意識に上ることすらないと思われるが、一方で歩行者、車いす利用者、自転車利用者などの交通弱者に我慢や苦痛を強いる例は枚挙に暇がない。

そして車は、高齢化にともなう交通問題、自家用車利用急増によるCO₂排出を大きな原因の一つとする地球温暖化、歩かなくなった人間の健康問題、あるいは社会保障問題、生活圏の発散による市街地の空洞化など、あらゆる面で指摘される社会問題の根元を成すと言っても過言ではない^{1,2)}。

このような中、政府は京都議定書批准に向けた「地球温暖化推進大綱」や、「全国総合開発計画」の中で、自転車利用の推進を謳っている。また、2000年に施行された「交通バリアフリー法」や建設省令の「重点整備地区における移動円滑化のために必要な道路の構造に関する基準」は、特に高齢社会に視点を置いて、歩行、自転車走行環境の改善、整備を進める施策として打ち出された。高齢者の多くが移動手段として徒歩（車いすを含む）、あるいは自転車を選択する事実から³⁾、歩道や自転車歩行者道の整備は、今後の高齢社会あるいは持続可能な共生社会のために、車道整備以上に重要課題の一つといつてよい¹⁾。

自転車歩行者道を継続的に整備していくためには、現状を調査すること、その結果や整備結果を管理するために、データベース化することが必要である。また、GIS（地理情報システム）を併用してバリアフリーマップやアクセシビリティマップなどの形で情報を公開することも重要になるだろう。本研究では、自転車歩行者道の状況（バリア）を調査するプローブ自転車を開発し⁴⁾、実際



図-1 プローブ自転車

の歩道や自転車歩行者道の調査に適用することが目的である。

2. プローブ自転車

市販の三輪自転車にセンサを装着してプローブ自転車とした（図-1）。

装着したセンサは、ハンドルのふれ角を計測する1回転式のポテンショメータ（Copal社製、JC22E）、段差や路面凹凸を通過したときに生じる振動加速度を計測する2軸の加速度センサ（Analog Devices社製、ADXL210）、走行スピードを計測する磁気センサ（CATEYE社製、CC-VL100）、歩道の縦断勾配と横断勾配を計測する2軸の加速度センサ（Analog Devices社製、ADXL202）および2個のジャイロセンサ（村田製作所社製、ENC-03JA）であった。

ポテンショメータは、ハンドルステム下のフレームに装着し、ハンドルの回転にともなうステムの回転を検出した（図-2）。段差通過時の振動加速度を計測する加速度センサはポテンショメータと同じ位置に、2軸の感度方向を鉛直方向と前後方向に合わせて装着した（図-2）。

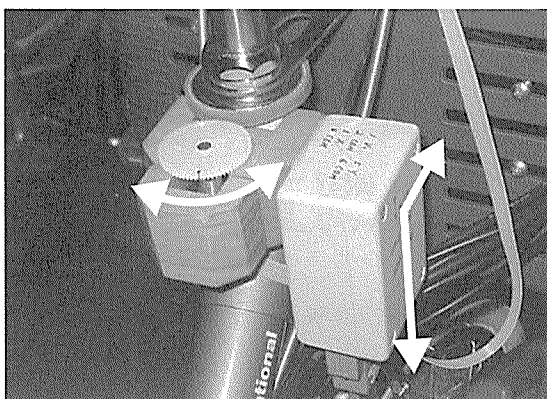


図-2 ハンドルふれ計測用のポテンシオメータと振動加速度計測用の加速度センサのボックス

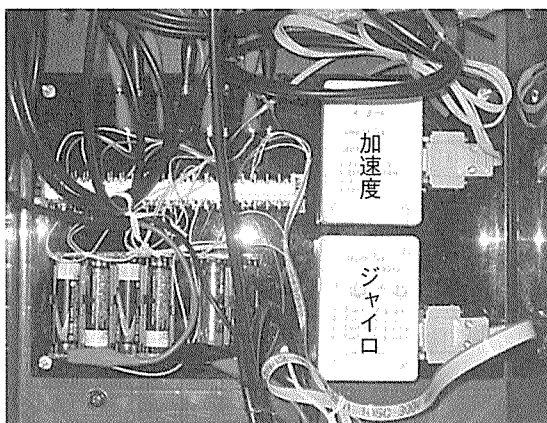


図-3 後部荷台の勾配と角速度計測用の加速度センサのボックスとジャイロセンサのボックス

縦断と横断両方向の勾配を計測する加速度センサは、後部荷台に装着した(図-3)。センサの2軸の感度方向は前後左右で、荷台が水平の時に0Gになるように装着し傾斜センサとして用いた。ジャイロセンサは後部荷台の動的な傾斜変化を検出するために、ロールとピッチの角速度を計測できるように装着した(図-3)。

計測した信号は、長さ15秒、精度12bit、周波数500Hzでサンプルし、運転手の背中に背負ったノートブック型パーソナルコンピュータ(東芝社製、Libretto L3)に取り込んだ。

3. 段差計測

(1) 実験方法

自転車歩行者道と車道との間に存在する段差の高さを推定するために、加速度センサにより段差通過時の振動加速度を計測した。計測した加速度と走行スピードから、回帰分析により段差高さを推定した。

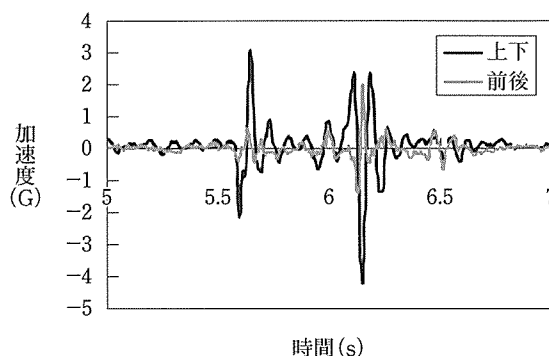


図-4 段差通過時の加速度波形例

滑らかに舗装された実験走行路上に木製の板を重ねた段差を設置し、その上をプローブ自転車で通過した。段差の高さは10, 20, 30, 40および50mmの5種類で、同一段差において5回の試技を行った。自転車の走行スピードは、5回の試技において8~16km/hの範囲で5段階のスピードとなるよう主観で走り分けてもらった。タイヤ空気圧は3.0kg/cm²とした。

(2) 分析方法

段差通過時にハンドルシステム下で計測した衝撃加速度を用いて、段差高を推定するために、次のような線型モデル(重回帰モデル)をたてた。

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + b \quad (1)$$

ここで y は(合成の)振動加速度(G)、 x_1 は走行スピード(km/h)、 x_2 は段差高(mm)、 a_1 、 a_2 、 b は定数である。

(3) 結果

図-4に2軸の加速度センサにより計測した、上下方向と前後方向の加速度波形の一例を示す。これは、高さ20mmの段差を14~15km/hのスピードで通過(上り下り)したときの加速度波形である。最初の正のピークが、プローブ自転車の前輪が段差を上ったとき、2つ目の負のピークが段差から落ちたときに相当する。段差通過時に生じる振動加速度は、この2軸の成分がほとんどであり、3軸目の左右方向の加速度は必要ないと判断された。

図-5に2軸の加速度を合成した加速度の一例を示す。この合成加速度波形のピーク値を重回帰モデル式(1)の y とした。

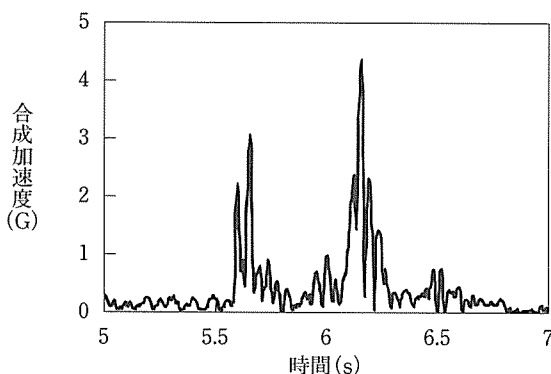


図-5 合成加速度波形例

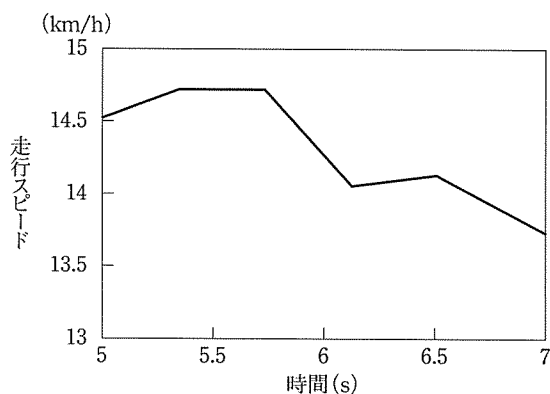


図-6 段差通過時の走行スピード波形例

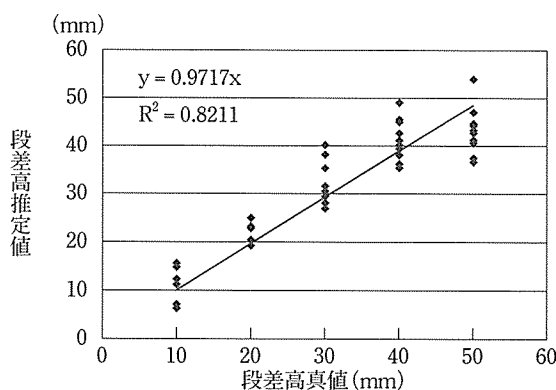


図-7 重回帰モデルによる推定結果

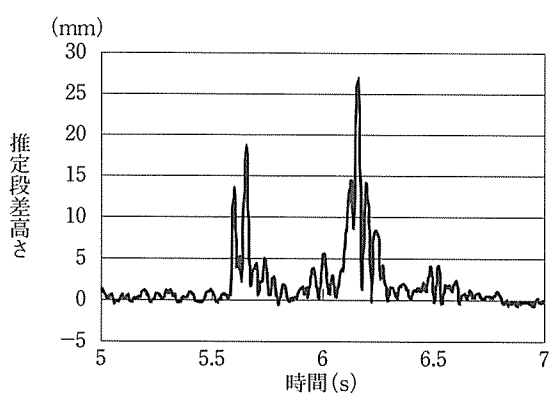


図-8 段差高推定の一例

図-6 に磁気センサにより計測した車輪の回転信号を線形補間して求めた走行スピードの例を示す。

図-6 から求められる、段差通過時の走行スピードを重回帰モデルの x_1 とし、全25試技の計測結果から次のようなモデルが決定された。

$$y = 0.056x_1 + 0.117x_2 + 0.242 \quad (2)$$

上式を、段差高を推定する式に変形すると、

$$x_2 = 8.547y - 0.479x_1 - 2.068 \quad (3)$$

となる。(3)式を用いることにより、走行中に計測される衝撃加速度 y と走行スピード x_1 から、段差高 x_2 を推定することができた(決定係数0.82)

(図-7)。図-8 に推定した時系列結果の一例を示す。

4. 幅員計測

(1) 実験方法

自転車歩行者道の幅員を、スラローム走行したときの走行軌跡の幅から求めるために、一定幅員の実験走行路をスラローム走行し、ハンドルふれ角と走行スピードから走行軌跡を求めた。

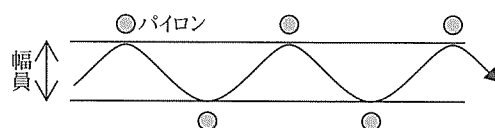


図-9 幅員計測実験のスラローム走行

実験走行路上に幅員を示す白線を引き、前輪がその白線に触れるようにスラローム走行を行った(図-9)。幅員は、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1、1.5および2 mであった。走行路の幅員を示す線の外側に5 m間隔でパイロンを設置し、走行の目安とした。

(2) 分析方法

走行軌跡は、時間 t の関数としてのハンドルの振れ角 $\theta(t)$ と走行スピード $S(t)$ から、任意の時刻 t_0 における自転車の位置座標(進行方向座標、ふれ方向座標)が、

$$\left(\int_0^{t_0} S(t) \cos \theta(t) dt, \int_0^{t_0} S(t) \sin \theta(t) dt \right) \quad (4)$$

により求められる⁵⁾。

しかし、走行軌跡は車輪の傾き角(キャンバ角)の影響も考慮しなければならない。キャンバ角 ϕ

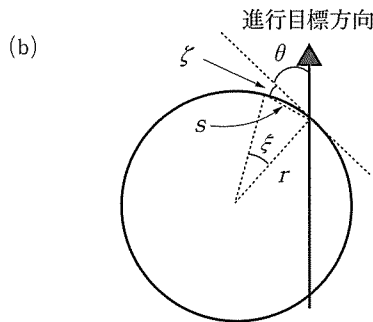
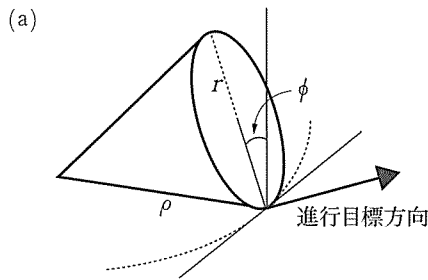


図-10 (a)半径 r の車輪がキャンバ角 ϕ において転がる回転弧の半径を ρ とする。(b)キャンバ角が $\pi/2$ で、 $\rho=r$ のときの図。進行方向に対するハンドルふれ角を θ 、キャンバ角が生じることによるずれ角を ζ 、単位時間に進む距離を s 、回転角を ξ とする。

と回転半径 ρ との間には、車輪の半径を r として次のような関係がある (図-10(a))。

$$\rho = \frac{r}{\sin \phi} \quad (5)$$

また、キャンバ角 ϕ が生じることにより、ハンドルのふれ角 θ より ζ 分だけ、さらにふれ角が大きくなる (図-10(b))。

したがって、式(4)はキャンバ角 ϕ により生じる角 ζ を考慮して、式(6)のように書かれる。

$$\left(\int_0^{t_a} S \cos(\theta + \zeta(\phi(t))) dt, \int_0^{t_a} S \sin(\theta + \zeta(\phi(t))) dt \right) \quad (6)$$

ここで、キャンバ角 ϕ を $\pi/2$ ($\rho=r$ のとき) (図-10(b))、時刻 t_1 から t_2 の間に進む距離を s としたとき、

$$2\pi r \xi = 2\pi s \quad (7)$$

となり、車輪回転角 ξ は、

$$\xi = \frac{s}{r} \quad (8)$$

となる。このときキャンバ角 ϕ により生じる角 ζ は、

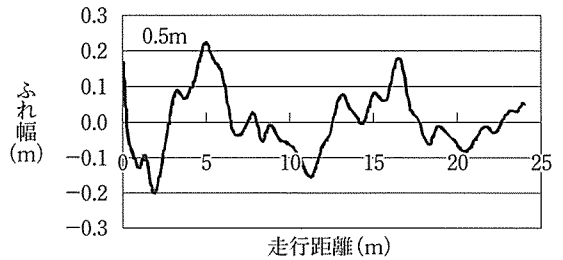


図-11 幅員0.5mでのスラローム走行結果

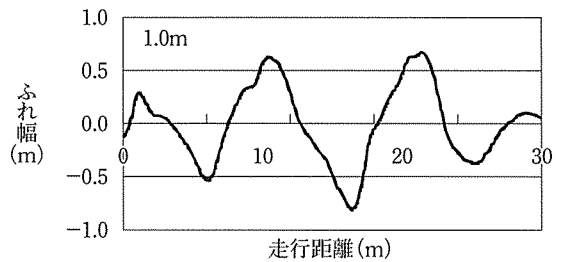


図-12 幅員1.0mでのスラローム走行結果

$$\zeta = \frac{\xi}{2} \quad (9)$$

であり、任意の ϕ について、

$$\zeta = \frac{\xi}{2} \sin \phi \quad (10)$$

となる。しかし、実走行においては $s < r$ かつ、 $\sin \phi \ll 1$ であることから、 ζ を無視することができる。結局、任意の時刻 t_a における自転車の位置座標は、

$$\left(\int_0^{t_a} S(t) \cos \theta(t) dt, \int_0^{t_a} S(t) \sin \theta(t) dt \right) \quad (4)$$

で求めることができる。

(3) 結果

図-11, 12, 13はそれぞれ幅員0.5m, 1m, 2mの走行路をスラローム走行したときの、ハンドルふれ角と走行スピードから(4)式を用いて求めた走行軌跡例である。

また、表-1に軌跡波形のピーク間距離から求めた幅員の推定範囲を示す。

幅員が狭いケースでは最大約45%の大きな誤差が見られたが、1.5mや2.0mでは10%程度と小さかった。

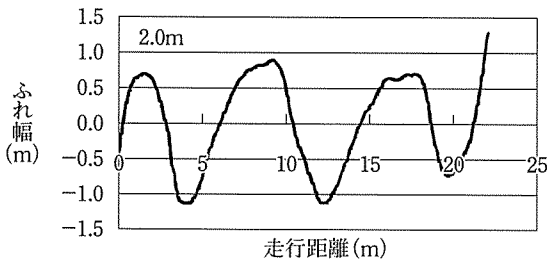


図-13 幅員2.0mでのスラローム走行結果

表-1 軌跡から求めた幅員 (m)

幅員	軌跡から求めた幅員
0.5	0.3~0.4
0.6	0.4~0.6
0.7	0.7~0.9
0.8	0.5~1.0
0.9	0.8~1.3
1.0	1.0~1.4
1.5	1.4~1.7
2.0	1.8~2.0

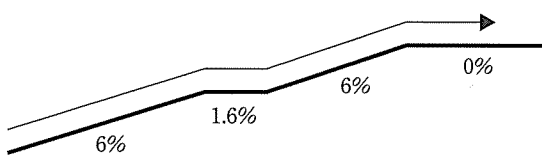


図-14 勾配計測を行ったスロープの勾配

5. 勾配計測

(1) 実験方法

自転車歩行者道の縦断勾配、横断勾配を計測するために、加速度センサとジャイロセンサを用いた。ここでは加速度センサによる計測結果を示す。

縦断勾配5%および10%の木製簡易スロープを作製し、スロープ上に自転車を静止させた状態から下降させた。また、既設スロープの実走行も行った(図-14)。

(2) 分析方法

加速度センサの出力(ロール, ピッチ)を、次式により勾配 grad (%)に変換した。

$$\text{grad} = \tan^{-1}(\sin^{-1}(\text{accel})) \times 100 \quad (11)$$

ただし、加速度センサの出力には、重力加速度以外に、直線加速度、回転運動にともなう遠心加速度、振動による加速度などが含まれるため、これらを除かなければ、勾配の影響による重力成分を抽出することができない。そこで本研究では、

トレンドモデルを用いて、カルマンフィルタと平滑化アルゴリズムにより、振動的な波形から勾配の影響によるトレンドの抽出を行った⁶⁾。

観測される加速度センサの出力 $y_j = \{y_1, \dots, y_n\}$ は、トレンド t_j に白色雑音 w_j を加えた

$$y_j = t_j + w_j \quad (12)$$

として表現できる。そして、このトレンドモデルは、状態空間モデルにより、

$$x_j = Fx_{j-1} + Gv_j \quad (13)$$

$$y_j = Hx_j + w_j$$

と表すことができる。ただし、状態ベクトル x_j は k 次元ベクトル、 F , G , H はそれぞれ $k \times k$ 行列、 k 次元縦ベクトル、 k 次元横ベクトル、 v_j はシステムノイズ、 w_j は観測ノイズである。ここでは、 $k=2$ とした。

$$x_j = \begin{bmatrix} t_j \\ t_{j-1} \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$G = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, H = [1 \ 0]$$

カルマンフィルタでは、時刻 n における観測値の状態 x_n の推定を行った。ただし、 $j > n$ であることから平滑化となる。そして、状態 x_n の条件付き平均と分散共分散行列を

$$x_{n|j} \equiv E(x_n | y_j) \quad (15)$$

$$V_{n|j} \equiv E(x_n - x_{n|j})(x_n - x_{n|j})^t$$

とし、次のアルゴリズムの繰り返しによりフィルタを実行した。

$$x_{n|n-1} = F_n x_{n-1|n-1} \quad (16)$$

$$V_{n|n-1} = F_n V_{n-1|n-1} F_n^t + G_n Q_n G_n^t$$

$$K_n = V_{n|n-1} H_n^t (H_n V_{n|n-1} H_n^t + R_n)^{-1} \quad (17)$$

$$x_{n|n} = x_{n|n-1} + K_n (y_n - H_n x_{n|n-1})$$

$$V_{n|n} = (I - K_n H_n) V_{n|n-1}$$

さらに、カルマンフィルタの結果に、次のような固定区間平滑化アルゴリズムを適用した。

$$A_n = V_{n|n} F_{n+1}^t V_{n+1|n}^{-1} \quad (18)$$

$$x_{n|N} = x_{n|n} + A_n (x_{n+1|N} - x_{n+1|n})$$

$$V_{n|N} = V_{n|n} + A_n (V_{n+1|N} - V_{n+1|n}) A_n^t$$

(3) 結果

図-15に縦断勾配5%、図-16に縦断勾配10%のスロープに停止した自転車を下降させ、0%に

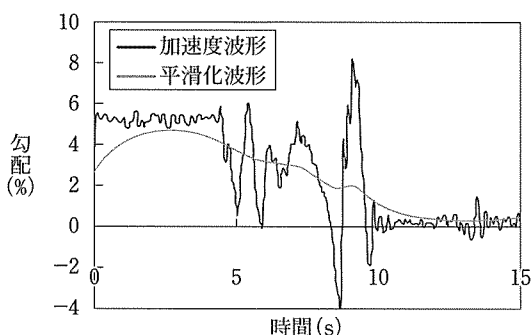


図-15 勾配5%のスロープを下降したときの加速度波形と平滑化波形

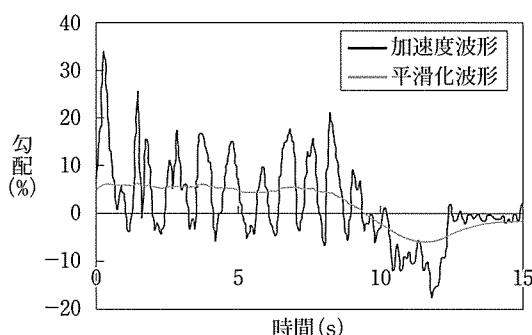


図-17 図-14に示すスロープを登坂したときの加速度波形と平滑化波形

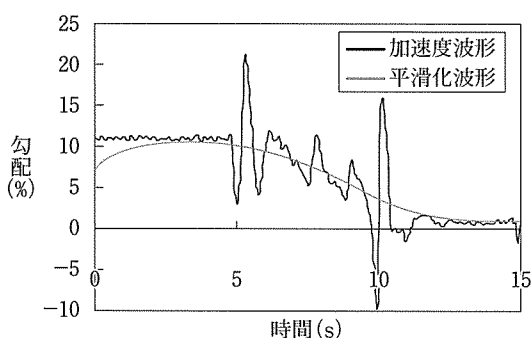


図-16 勾配10%のスロープを下降したときの加速度波形と平滑化波形

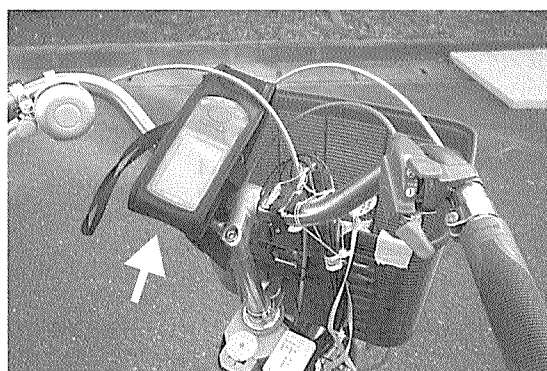


図-18 プローブ自転車のハンドルバーにGPSを固定した

停止させたときの加速度波形から求めた勾配（ピッチ角）とその平滑化波形を示す。停止状態では、加速度センサの出力がほぼ勾配を示しているが、自転車の降下にもなう運動により、種々の加速度の影響が波形に現れた。その平滑化波形は、加速度波形の振動成分を除去することができたが、斜面停止時の波形に平滑化による誤差が生じた。

図-17に、図-14で示したスロープを登坂したときの加速度波形と平滑化波形を示す。約6%の勾配は、平滑化によりほぼ推定できたが、スロープ途中の踊り場の1.6%（図中5～6秒）はその変化に追従できない結果となった。また、スロープを登り切ったところ（図中10秒以降）では、正から負への反対方向への振動により偽（下り）の勾配が推定される結果となった。

6. 調査例

以上の手法を用いて、プローブ自転車により歩道、自転車歩行者道の調査を行った。プローブ自転車にGPS（EMPEX社製、ポケナビmap21ex）を装着し（図-18）、調査ルートは緯度経度データを一旦GPSのメモリ媒体に記録した。その後、

オフラインで各センサ出力との同期をとった。各センサの出力は長さ60秒、精度12bit、周波数500Hzでサンプリングし、ノートブック型コンピュータに取り込んだ。

図-19は段差、図-20は幅員の推定結果をGIS上に重ね合わせた例を示している。図に示す調査範囲は、佐賀大学周辺道路の歩道あるいは自転車歩行者道である。段差、幅員ともに高さや幅毎に色分けし、状態を可視化した。

7. 考察

(1) 推定精度、手法

自転車歩行者道の整備状況に関する情報を、走行しながら収集するプローブ自転車を開発した。プローブ自転車には、加速度センサ、ポテンシオメータ、ジャイロセンサなど装着し、段差、幅員、勾配を計測、推定するシステムを構築した。

段差の高さ推定では、段差の境界形状が一定という条件下で実用に耐えうる推定結果が得られた。しかし、実際の歩車道境界などに存在する段差形状は、新旧入り乱れていることや、反映されるべき交通弱者である車いす利用者、高齢歩行者や視覚障害者の意見が異なることなどのため、ガイド

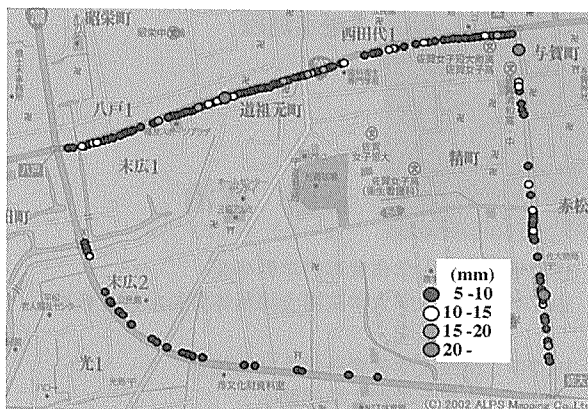


図-19 プローブ自転車により計測した加速度から推定した段差の分布

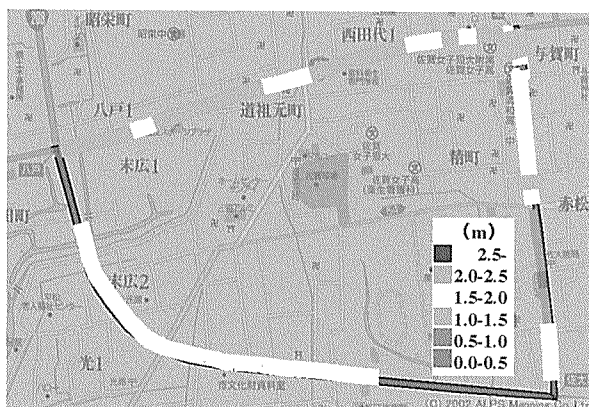


図-20 プローブ自転車により計測したハンドルふれと走行スピードから推定した幅員の分布 (色のない部分はデータの欠落部)

ライン⁷⁾が提示されているにもかかわらず多様に飛んでいるといえる。このような段差形状の違いを推定パラメータに含めるためには、振動加速度波形の瞬時周波数情報などを抽出することが必要になるだろう。最終的には、形状を考慮して高さの閾値を設定し、歩行、車いす走行、自転車走行に対するバリアとして表現することが実用的であると考えられる。

一方、歩道上の舗装も、歩車道境界の段差とともに、交通弱者のバリアになる可能性がある。荒れた舗装やインターロッキング、タイル舗装などは種類によっては、高齢歩行者や杖歩行者の滑り、引っかかり、あるいは車いす利用者の走行振動にともなう痙性、そして転倒につながる可能性が高い⁸⁾。このような舗装の情報、つまり、舗装の優劣やインターロッキングのサイズや目地間隔なども加速度センサを用いた計測により、推定することが可能だろう⁹⁾。また、このような路面の情報は、段差も含めて、走行の快適性として総合的に評価することも可能である。

幅員の推定では、幅員が小さいほど誤差の相対

値が大きくなる傾向が認められたが、絶対値では幅員の大きさに関係なく、最大0.2~0.4mであった。今後、この精度向上は必須であるが、計測手法の見直しも視野に入れておく必要がある。本研究では、スラローム走行による間接的な幅員計測であり、この手法には、ヒューマンエラーの介在が避けられない。つまり、計測者の走行技術等の影響が避けられない。また、歩道や自転車歩行者道の混雑具合によっては、計測できないことも起こり得る。したがって、今後、カメラを用いた画像分析手法などを検討することにより手法の改善拡張が必要である。

勾配の推定では、種々の加速度の影響を受ける加速度センサの出力から、平滑化によりそのトレンドを計算することにより勾配を推定できることがわかった。しかし、例えば、車用のすりつけ勾配が設けられている波打ち状の歩道では、自転車走行中の勾配変化が激しくなるため、平滑化による推定ではその変化に追従できない可能性もある。また、勾配変化地点でおこる振動的反応により、正負逆転した勾配が推定されることもある。これらを解決するために、さらに何らかの電氣的なフィルタリングや信号処理の工夫が必要になるだろう。あるいは、ジャイロセンサの出力を加速度センサの出力とフュージョンすることで、実際の推定精度を向上できる可能性もある。

(2) 調査システムとしての課題

現在、センサの出力はA/Dコンバータを介してコンピュータに直接記録しているが、記録媒体の容量の都合上、長時間、大規模データの記録は困難である。計測チャンネル数、サンプリング周波数を抑えることも解決方法の一つであるが、大容量のデータレコーダの利用、あるいは、携帯電話等のIT機器を用いて、直接サーバへデータを伝送する方法も将来的には検討の余地がある。

一方、地図に計測データを重ね合わせるためには、GPS等を利用した測位システムが必要である。GPSの精度は数m~十数mといわれており、このままでは実用的な測位とは言い難い。歩行者支援等の目的でGISを構築する場合、国土地理院発行の2,500分の1の地図か、さらに小縮尺の地図を用いる必要がある。そこでの表示誤差はかなり大きなものとなる。また、走行環境によっては、GPSが衛星信号を受信できない場合も考えられる。そのようなトラブルを踏まえて、自転車の走行スピードをもとに、GPSデータを補間する方法も確立しておく必要がある。

GIS のソフトウェアは近年、さらに充実してきており、データを地図データとリンクさせたデータベース機能も備えている。一方、このような地図コンテンツを作製するためには、膨大な作業を要するのが通例で、矢入ら¹⁰⁾の例のように駅周辺12km²のデータ収集にのべ80人日を要したことから、データの効率的な収集、解析、視覚化手法の確立は急務であると思われる。本研究の場合、時系列データを処理した結果をリンクさせることになるため、前出のGPSデータとの完全同期と、時系列解析部分をプリプロセッサとして内蔵するシステム、およびGISにおける可視化を自動的に行うシステム構築などが今後の課題である。

参考文献

- 1) 斎藤健治, 清田 勝: 自転車利用の視点から見た持続可能な共生社会における環境, 社会福祉・健康, 教育, Human Interface, 6(1), pp. 1-8, 2004.
- 2) 斎藤健治: 「ひと」的視座における「まち」. 佐賀大学理工学部集報, 第32巻, 第2号, pp. 13-18, 2003.
- 3) 東京都生活文化局消費生活部生活安全課商品安全係: 高齢者の事故防止マニュアル; http://www.shouhiseikatu.metro.tokyo.jp/k_joho/anzen/anzen6.html, 2002.
- 4) 斎藤健治, 甲斐裕幸, 井上伸一, 清田 勝: 自転車歩行者道のバリア調査のためのブロープ自転車, 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会, Dynamics and Design Conference2003, CD-ROM, No.03-7, 2003.
- 5) 斎藤健治, 井上伸一, 細谷 聡, 清田 勝: ハンドルと車体のふれからみた高齢者の自転車操作の特徴, 人間工学, 第39巻, 第5号, pp. 241-249, 2003.
- 6) 北川源四郎: 時系列解析プログラミング, 岩波書店, 1993.
- 7) 国土交通省: 道路の移動円滑化整備ガイドライン, 大成出版社, 2003.
- 8) 津田美知子: 歩行者の道 通行帯のデザイン, 技法堂出版, 2002.
- 9) 白川龍生, 川村 彰, 中島繁則, 中辻 隆: 車両の振動加速度を利用した路面プロファイル推定システムについて, 交通工学, 第38巻, 第6号, pp. 32-41, 2003.
- 10) 矢入(江口) 郁子, 吉岡 裕, 小松正典, 猪木誠二: 歩行者支援 GIS のための歩行空間アクセシビリティ情報の蓄積と評価, Human Interface, 第5巻, 第4号, pp. 17-24, 2003.



著者略歴

斎藤 健治

(さいとう けんじ)

1987年 筑波大学体育専門学群卒業
 1997年 筑波大学大学院博士課程体育科学研究科単位取得退学
 1997年 筑波大学体育科学系文部技官
 2001年 佐賀大学理工学部助手
 2002年 佐賀大学理工学部講師
 博士(体育科学)